



Некрасова Л.П.

Мониторинг загрязнения природной воды методом флуоресцентной спектроскопии

ФГБУ «Центр стратегического планирования и управления медико-биологическими рисками здоровью»
Федерального медико-биологического агентства, 119121, Москва, Россия

Введение. Экологический мониторинг состояния водоёмов является важной составляющей природоохранной деятельности. Перспективным направлением оценки качества водных объектов является определение их обобщённых показателей. Флуоресцентная спектроскопия может служить источником важной информации о состоянии водных объектов и источниках их загрязнения.

Цель исследования – методом флуоресцентной спектроскопии оценить загрязнённость воды Москвы-реки и её притоков. Выявить влияние нефтепродуктов на спектры флуоресценции речной воды.

Материалы и методы. Объектом исследования являлась вода из Москвы-реки и её притоков: Пахра, Котловки, Сетуни. Пробы воды из Москвы-реки отобраны в черте города на разных участках, для которых характерна различная степень загрязнённости. Спектры флуоресценции воды измеряли на спектрофлуориметре SM 2203 (ЗАО «Солар», Беларусь), общий органический и неорганический углерод – на анализаторе общего углерода TOC-VCHP (Shimadzu, Япония).

Результаты. Характер спектров флуоресценции Москвы-реки и её притоков в отсутствие значимых антропогенных загрязнений характеризуется относительным постоянством. Бактериальное загрязнение и загрязнение ароматическими соединениями антропогенного происхождения, в том числе нефтепродуктами, приводят к увеличению интенсивности флуоресценции в коротковолновой части спектра. Коэффициент корреляции между оптической плотностью при длине волны 254 нм и содержанием растворённого органического углерода (РОУ) для исследованных проб составил 0,66, а между интенсивностью флуоресценции при длине волны 400 нм и РОУ – 0,74.

Ограничение исследования. Метод не может быть использован для количественного определения индивидуальных веществ, предназначен для полуквантитативной оценки загрязнённости воды.

Заключение. Измерение спектров флуоресценции и содержания общего органического углерода позволяет дать общую оценку загрязнённости водного объекта (что особенно актуально для пробы неизвестного состава) и выбрать оптимальную схему его целевого анализа. Высокие значения РОУ и интенсивности флуоресценции при 320 нм с высокой вероятностью свидетельствуют о химическом загрязнении воды, а значения РОУ, характерные для водного объекта, и высокие интенсивности флуоресценции при 320 нм – о бактериальном.

Ключевые слова: спектры флуоресценции; растворённый органический углерод; природная вода; нефтепродукты

Соблюдение этических стандартов: исследование не требует предоставления заключения комитета по биомедицинской этике или иных документов.

Для цитирования: Некрасова Л.П. Мониторинг загрязнения природной воды методом флуоресцентной спектроскопии. *Гигиена и санитария*. 2022; 101(5): 578–582. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2022-101-5-578-582>

Для корреспонденции: Некрасова Лариса Петровна, канд. хим. наук, вед. науч. сотр. отд. физико-химических исследований и экотоксикологии ФГБУ «ЦСП» ФМБА России, 119121, Москва. E-mail: L.Nekrasova@cspmz.ru

Конфликт интересов. Автор декларирует отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов в связи с публикацией данной статьи.

Финансирование. Исследование поддержано государственным контрактом «Проведение аналитического обзора для определения приоритетных химических поллютантов в сточных водах мегаполиса и водных объектах, ими загрязнённых».

Поступила: 16.03.2022 / Принята к печати: 21.04.2022 / Опубликовано: 31.05.2022

Larisa P. Nekrasova

Monitoring of natural water pollution by fluorescence spectroscopy

Centre for Strategic Planning of FMBA of Russia, Moscow, 119121, Russian Federation

Introduction. Environmental monitoring of the state of water bodies is an important component of environmental protection. A promising direction for assessing the quality of water bodies is to determine their generalized indicators. Fluorescence spectroscopy can serve as a source of important information about the state of water bodies and sources of their pollution.

Purpose of the study – to assess the water pollution of the Moskva River and its tributaries using the fluorescence spectroscopy method. To reveal the influence of oil products on the fluorescence spectra of river water.

Materials and methods. The object of the study was water from the Moskva River and its tributaries: Pakhra, Kotlovka, Setun. Water samples from the Moskva River were taken in different parts of the city, which are characterized by varying degrees of pollution. Water fluorescence spectra were measured with SM2203 spectrofluorimeter (ZAO Solar, Belarus), total organic and inorganic carbon, on a TOC-VCHP total carbon analyzer (Shimadzu, Japan).

Results. The nature of the fluorescence spectra of the Moskva River and its tributaries in the absence of significant anthropogenic pollution are characterized by relative constancy. Bacterial pollution and pollution with aromatic compounds of anthropogenic origin, including oil products, leads to an increase in the fluorescence intensity in the short-wavelength part of the spectrum. The correlation coefficient between the optical density at a wavelength of 254 nm and the content of dissolved organic carbon (DOC) for the studied samples was 0.66, and between the fluorescence intensity at a wavelength of 400 nm and DOC was 0.74.

Limitations. The method cannot be used for the quantitative determination of individual substances; it is intended for a semi-quantitative assessment of water pollution.

Conclusion. Measurement of fluorescence spectra and total organic carbon makes it possible to give a general assessment of the contamination of a water body (which is especially important for a sample of unknown composition) and to choose the optimal scheme for its targeted analysis. High dissolved

organic carbon (DOC) values and high fluorescence intensity at 320 nm are highly likely to indicate chemical contamination of water, while DOC values characteristic of a water body and high fluorescence intensity at 320 nm indicate bacterial contamination.

Keywords: fluorescence spectra; dissolved organic carbon; natural water; oil products

Compliance with ethical standards. The study does not require submission of the opinion of the biomedical ethics committee or other documents.

For citation: Nekrasova L.P. Monitoring of natural water pollution by fluorescence spectroscopy. *Gigiena i Sanitariya (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2022; 101(5): 578-582. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2022-101-5-578-582> (In Russian)

For correspondence: Larisa P. Nekrasova, MD, PhD, DSci., Leading Researcher of the Department of Physical and Chemical Research and Ecotoxicology, Centre for Strategic Planning and Management of Biomedical Health Risks of the Federal Medical and Biological Agency, Moscow, 119121, Russian Federation. E-mail: L.Nekrasova@csmpmz.ru

Information about author: Nekrasova L.P., <https://orcid.org/0000-0002-1269-3161>

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Acknowledgement. The study was supported by the state contract "Conducting an analytical review to identify priority chemical pollutants in the wastewater of the metropolis and water bodies polluted by them."

Received: March 16, 2022 / Accepted: April 21, 2022 / Published: May 31, 2022

Введение

Экологический мониторинг состояния водоёмов является важной составляющей природоохранной деятельности. Несмотря на то что ПДК загрязнений определён примерно для 1500 соединений, контроль загрязнения водоёмов производится по очень ограниченному списку показателей [1], поскольку определение огромного числа параметров и их анализ представляется трудно решаемой задачей [2]. Перспективным направлением оценки качества водных объектов является определение их обобщённых показателей [3]. Флуоресцентная спектроскопия, будучи экспрессным и экономичным методом, способна предоставить важную информацию о качестве водных объектов и источниках их загрязнения [4–6]. Флуоресцентный метод используется для оценки функционирования первичных реакций фотосинтеза, характеризующих состояние фотосинтетического аппарата фитопланктона [7, 8], изучения экологического состояния водоёмов [9] и их гидрологического режима [10]. Метод успешно применяют для контроля технологии очистки в процессе водоподготовки воды [11], влияния водопроводных труб и тары на её качество [12, 13]. Перспективным является использование метода для изучения трансформации флуоресцирующих соединений в воде [14, 15]. Отмечено увеличение интенсивности флуоресценции природной воды при её бактериальном загрязнении [16]. Предложен метод определения концентрации бактерий по флуоресценции внутриклеточного никотиндиамидадениндинуклеотида (NADH) в природных водах [17]. Увеличение интенсивности флуоресценции отмечено при загрязнении природной воды стоками нефтеперерабатывающих производств [18]. Несмотря на очевидные достоинства этих методов исследования, их возможности недооцениваются в аналитических лабораториях.

Цель работы – оценка загрязнённости проб поверхностной воды Москвы-реки и её притоков методом флуоресцентной спектроскопии.

Материалы и методы

Объектом исследования являлась вода из Москвы-реки и её притоков: Пахры, Котловки, Сетуни. Пробы воды из Москвы-реки были отобраны в черте города на разных участках, для которых характерны различные степени загрязнения. Участок № 1 расположен сразу за чертой города с внутренней стороны и характеризовался по итогам длительных наблюдений относительным постоянством химического состава и отсутствием превышения ПДК веществ, установленных для воды культурно-бытового водопользования. Участок № 2 располагался в центральной части города с высокой плотностью застройки и нестабильным составом загрязняющих веществ. Участок № 3 наиболее загрязнён из-за сбросов неочищенных хозяйственно-бытовых сточных вод, а также вследствие речного судоходства.

Образцы воды исследовали с помощью спектрофотометра UV-1800 (Shimadzu, Япония), спектрофлуориметра CM 2203 (ЗАО «Солар», Беларусь); общий органический и неорганический углерод измеряли на анализаторе общего углерода TOC-VCHP (Shimadzu, Япония). Определение общего растворённого органического углерода (DOC) проводили методом NPOC (неудаляемый органический углерод). Перед измерениями пробы фильтровали через мембранный фильтр с диаметром пор 0,45 мкм.

Использовали препарат бифидумбактерин (живые бактерии *Bifidobacterium bifidum*), бычий сывороточный альбумин фракции V, pH 7,0 (Компания «ПанЭко»), водную вытяжку из сырой западносибирской нефти с плотностью 0,825, предоставленную Институтом проблем нефти и газа РАН. При приготовлении раствора сырой нефти к 0,6 мл нефти добавляли 6 мл воды и экстрагировали в течение 1 мин, давали время для разделения фаз, отбирали водную фазу. Перед спектральными измерениями водную фазу фильтровали через мембранный фильтр с диаметром пор 0,45 мкм. Оптическая плотность пробы при 260 нм составляла 0,125, при 280 нм – 0,082. Для измерения спектров флуоресценции использовали неразбавленный раствор. Для изучения флуоресценции бактерий использовали препарат бифидумбактерин (одна доза содержит не менее 10^7 КОЕ бифидобактерий) и вспомогательные вещества – желатин, молоко и сахарозу). Интерпретацию результатов проводили с учётом мешающего влияния флуоресценции вспомогательных веществ. Влияние белковых веществ на флуоресценцию воды изучали на примере бычьего сывороточного альбумина (БСА).

Результаты

Измерения проб воды проводили по следующим показателям: общий органический углерод (ТОС, NPOC), растворённый органический углерод (РОУ), общий неорганический (IC) углерод, оптическая плотность при 254; 380; 410; 530 и 860 нм, спектры флуоресценции при длине волны возбуждения 260 и 360 нм, синхронные спектры флуоресценции, светорассеяние при 700 нм. Измерения проводили для исходных проб, не предпринимая никаких дополнительных действий, и для проб, отфильтрованных через мембранный фильтр PVDF с диаметром пор 0,45 мкм. Полученные данные были проанализированы и сформирован оптимальный набор определяемых параметров для дальнейшей работы. Наиболее информативные из них представлены в таблице. Оптическая плотность исходных (мутных) проб выше, чем этих же проб, но отфильтрованных. Коэффициент корреляции между разностью оптических плотностей исходной и отфильтрованной проб (ΔD_{254}) и рассеянием при 700 нм составил 0,98. Для исходных проб наблюдался больший разброс значений измеряемых параметров, чем для отфильтрованных.

В литературе имеются данные о наличии корреляции между оптической плотностью при 254 нм (D_{254}), содержанием общего органического углерода, ХПК_{Cr} и БПК₅ [19].

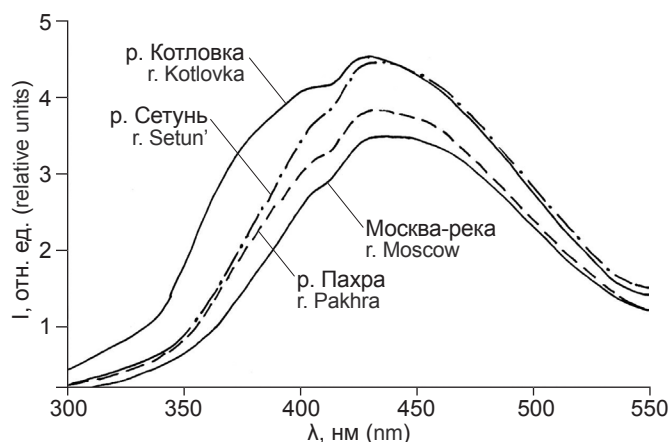


Рис. 1. Спектры флуоресценции природной воды.

Fig. 1. Fluorescence spectra of natural water.

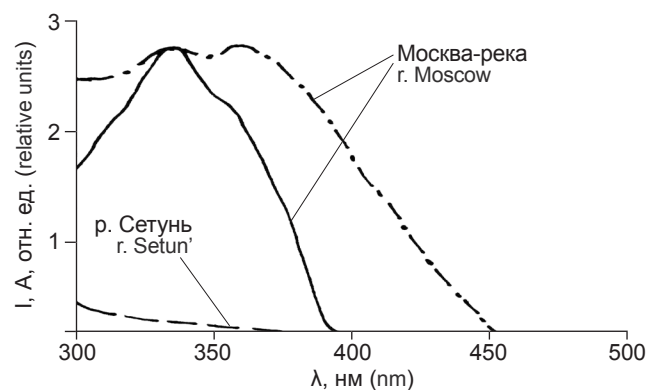


Рис. 2. Спектры поглощения и возбуждения флуоресценции воды из Москвы-реки.

Fig. 2. Absorption spectrum and fluorescence excitation spectra of water from the river Moscow.

Отмечалось, что такая корреляция наблюдается только при достаточно постоянном качественном составе вод. На основании анализа многочисленных данных и длительной апробации УФ-метода на пробах воды различных очистных сооружений Москвы и других городов России Министерство жилищно-коммунального хозяйства РСФСР в 1981 г. утвердило «Указания по спектрофотометрическому способу экспрессной оценки качества очистки сточных вод от органических загрязнений». Поэтому нами проведены параллельные измерения оптической плотности при 254 нм и растворённого органического углерода (РОУ). Рассчитан коэффициент корреляции между D_{254} и НРОС для фильтрованных проб (РОУ), который составил 0,66. Это свидетельствует о непостоянстве состава воды Москвы-реки в различных точках водоотбора и находит подтверждение также по абсолютным значениям общего органического и неорганического углерода.

На рис. 1 представлены спектры флуоресценции воды из Москвы-реки (образец 1-го участка), Пахры, Котловки и Сетуни. Представленные спектры имеют схожую форму, соотношение интенсивности в спектрах при 400 и 500 нм составляет 1,1–1,2. Спектр воды из р. Сетуни характеризуется повышенной интенсивностью флуоресценции в коротковолновой области спектра, что может быть объяснено присутствием органических веществ, нетипичных для водоёмов данного региона (вероятно, антропогенного происхождения).

Спектры поглощения образцов воды представляют собой бесструктурные полосы низкой интенсивности, поэтому малоинформативны (рис. 2). Поскольку чувствительность флуориметрического метода выше на несколько порядков, чем спектрофотометрического, информативность этого метода также существенно выше. Кроме спектра флуоресценции, который наблюдают при возбуждении образца волной определённой длины, на спектрофлуориметре можно регистрировать и спектр возбуждения флуоресценции, который для многих соединений совпадает с его спектром поглощения. Так, на рис. 2 видно, что флуоресцирующими центрами образца № 6 Москвы-реки являются соединения с максимумами поглощения примерно 330 и 360 нм. Спектры флуоресценции исследованных образцов представлены одной широкой полосой с перегибом вблизи 410 нм и максимумом 433–440 нм.

Для оценки влияния нефтепродуктов и бактерий на спектры флуоресценции речной воды измерены спектры флуоресценции водной вытяжки из сырой нефти, раствора бифидобактерий, а также спектры флуоресценции водопроводной и речной воды с их добавлением. Основными компонентами нефти являются углеводороды (алканы, нафтены и ароматические углеводороды). Наиболее растворимы ароматические

углеводороды, для многих из которых характерна способность флуоресцировать. Поэтому при попадании этих соединений в воду интенсивность её флуоресценции увеличивается. В зависимости от химического состава нефтепродуктов увеличение интенсивности свечения может наблюдаться в различных областях спектра. При возбуждении водной вытяжки разными длинами волн флуоресцируют различные компоненты нефти. Максимальная интенсивность флуоресценции наблюдалась при длине волны возбуждения 270 нм. При возбуждении 260 нм наблюдается несколько максимумов, высокая интенсивность в спектре сосредоточена в области 293–347 нм. При добавлении в воду нефтепродуктов увеличивается соотношение I_{320}/I_{450} (см. таблицу).

При возбуждении раствора бифидобактерий при длине волны 260 нм наблюдается максимум при 353 нм, а при длине волны 360 нм – максимум при 434 нм. Поэтому при возбуждении флуоресценции речной воды с добавлением бифидобактерий наблюдается увеличение интенсивности в коротковолновой области спектра (длина волны возбуждения 260 нм) и в максимуме спектра флуоресценции при возбуждении 360 нм. При возбуждении раствора БСА волной 260 нм наблюдается флуоресценция триптофана с максимумом 336 нм. Однако интенсивность этой флуоресценции невелика, следовательно, маловероятен её вклад в сигнал флуоресценции природной воды. Следует отметить, что многие низкомолекулярные ароматические соединения флуоресцируют в области 290–350 нм, поэтому загрязнения этими соединениями будет увеличивать интенсивность свечения воды в коротковолновой области спектра. Так, при длине волны возбуждения 260 нм увеличение интенсивности флуоресценции природной воды на 1 единицу в области 300–350 нм будет наблюдаться при концентрации фенола 0,06 мг/дм³, бифенила 0,006 мг/дм³, БСА – 350 мг/дм³ и бифидобактерий при концентрации 10⁴ КОЕ.

Из представленных в таблице данных видно, что содержание общего органического углерода увеличивается по мере протекания реки по территории города, а в районе Южного порта достигает высоких значений. Также увеличивается соотношение интенсивности флуоресценции при 320 и 450 нм в спектре флуоресценции при длине волны возбуждения 260 нм. Оптическая плотность при 254 нм также достигает заметных отличий для последнего образца, а для всех других имеет примерно одинаковые значения. Интенсивность флуоресценции при 320; 400 и 450 нм исходных (мутных) проб и прозрачных (отфильтрованных) при длине волны возбуждения 260 и 360 нм практически не зависит от мутности пробы: при 320 нм незначительное уменьшение I , при 400 и 450 нм – незначительное её увеличение (порядка 3–5%). В то же время интенсивность флуоресценции в синхронных спектрах уменьшается примерно в 10 раз при сохранении вида спек-

Физико-химические характеристики речной воды

Physical and chemical characteristics of river water

Образец Sample	POУ DOC	IC	D ₂₅₄	I ³²⁰ ₂₆₀	I ⁴⁰⁰ ₂₆₀	I ⁴⁵⁰ ₂₆₀	I ³²⁰ / I ⁴⁵⁰	I ⁴⁵⁰ ₃₆₀
Водопроводная вода / Tap water	4.2	33.91	0.116	0.192	1.230	1.661	0.08	0.981
Водная вытяжка из нефти / Water extract from oil	—	—	0.148	7.1	1.8	1.1	7.0	—
Водопроводная вода + водная вытяжка из нефти (0.1/2) Tap water + water extract from oil (0.1/2)	—	—	0.122	0.365	0.880	0.835	0.44	—
Москва-река, № 1 / Moscow River, No. 1	7.95	33.91	0.268	0.251	2.016	3.02	0.08	2.156
Москва-река, № 2 / Moscow River, No. 2	7.03	34.53	0.268	0.32	2.209	3.118	0.10	2.174
Москва-река, № 3 / Moscow River, No. 3	7.54	34.36	0.27	0.278	2.065	3.06	0.09	2,94
Москва-река, № 4 / Moscow River, No. 4	10.06	34.48	0.267	0.283	2.111	3.074	0.09	2.156
Москва-река, № 5 / Moscow River, No. 5	8.33	50.16	0.259	0.807	3.662	4.552	0.18	2.831
Москва-река, № 6 / Moscow River, No. 6	10.31	38.15	0.264	0.395	2.469	3.392	0.12	2.293
Москва-река, № 7 / Moscow River, No. 7	26.04	57.48	0.313	0.834	4.463	5.41	0.15	3.495
р. Сетунь, № 1 / r. Setun, No. 1	9.57	52.46	0.17	0.795	3.081	3.585	0.22	1.798
р. Котловка / r. Kotlovka	3.1	36.8	0.114	0.458	2.212	2.525	0.18	—
р. Клязьма / r. Klyazma	5.2	27.4	0.155	0.256	2.461	3.286	0.08	—
р. Пахра / r. Pakhra	—	60.6	0.155	0.39	2.951	3.734	0.10	—
<i>Bifidobacterium bifidum</i> 10 ⁴ КОЕ / CFU	—	—	0.071 (260 нм)	3.70	3.0	1.05	3.52	2,35
<i>Bifidobacterium bifidum</i> 10 ³ КОЕ / CFU (р. Сетунь / r. Setun)	—	—	—	2.79	4.60	4.18	0,90	3.11
р. Сетунь, № 2 / r. Setun, No. 2	—	—	0.16	0.295	3.26	3.91	0,08	—

Примечание. D₂₅₄ — оптическая плотность при длине волны 254 нм (l = 1 см); I³²⁰₂₆₀, I⁴⁰⁰₂₆₀, I⁴⁵⁰₂₆₀ — интенсивность флуоресценции при 320; 400 и 450 нм (длина волны возбуждения 260 нм), I⁴⁵⁰₃₆₀ — интенсивность флуоресценции при 450 нм (длина волны возбуждения 360 нм). I³²⁰/I⁴⁵⁰ — отношение интенсивностей при 320 и 450 нм (длина волны возбуждения 260 нм); POУ — растворённый органический углерод; IC — общий неорганический углерод; «—» — измерения не проводили.

Note: D₂₅₄ — optical density at a wavelength of 254 nm (l = 1 cm); I³²⁰₂₆₀, I⁴⁰⁰₂₆₀, I⁴⁵⁰₂₆₀ — fluorescence intensity at 320; 400 and 450 nm (excitation wavelength 260 nm), I⁴⁵⁰₃₆₀ — fluorescence intensity at 450 nm (excitation wavelength 360 nm); I³²⁰/I⁴⁵⁰ is the intensity ratio at 320 and 450 nm (excitation wavelength 260 nm), DOC is dissolved organic carbon, IC is total inorganic carbon.

тра. Коэффициент корреляции между интенсивностью флуоресценции при длине волны 400 нм в спектре, полученном при длине волны возбуждения 260 нм, и NPOC составляет 0,74. Значение, близкое к 0,66, — в корреляции D₂₅₄ — NPOC. Корреляция между интенсивностью I₄₀₀—I₃₂₀ составляет 0,93, а корреляция I₄₀₀—I₄₅₀ равна 0,98. Таким образом, выбор любого из этих параметров можно считать равнозначным, поскольку они принадлежат одному свойству. Предпочтение отдано I₄₀₀. Корреляция между I₄₀₀ при возбуждении 260 нм и I₄₅₀ при возбуждении 360 нм составляет 0,81. Данное значение может быть связано как с различным бактериальным загрязнением проб воды, так и с их различным химическим составом.

Обсуждение

Спектры флуоресценции природной воды по данным [20, 21] представляют собой широкие полосы с максимумами в области 316–340 и 420–450 нм. Полагают, что полоса флуоресценции с максимумом вблизи 316–340 нм обусловлена антропогенными ароматическими соединениями [22, 23]. Данное мнение оспаривается в работе [24] на основании присутствия данной полосы при культивировании микроводорослей в дистиллированной воде. Авторы, изучившие относительно чистые воды Кольского полуострова, не обнаружили связи интенсивности полосы 316–340 нм с концентрацией нефтепродуктов и полагают, что данная полоса обусловлена аминокислотами, фенольными кислотами и пептидами. Использование высокоэффективной жидкостной хроматографии одновременно с регистрацией спектров поглощения и флуоресценции по-

зволило выделить три типа флуорофоров: гуминоподобный гидрофильный с максимумом флуоресценции 420 нм, гуминоподобный гидрофобный и протеиноподобный с максимумом испускания 340–350 нм [25]. Максимум флуоресценции зависит от длины волны возбуждающего света [20]. В качестве оптимальных длин волн возбуждения при изучении флуоресценции природной воды приняты 250–270 нм. Флуоресценция поверхностной воды с максимумом при 420–450 нм обусловлена присутствием в ней преимущественно гуминовых и фульвовых кислот. Показано, что при возбуждении пробы речной воды волной, длина которой находится в диапазоне 320–380 нм, регистрируется сигнал флуоресценции внутриклеточного NADH живых бактерий, что позволяет количественно определять их концентрацию в воде [17]. При этом следует иметь в виду, что спектральные области флуоресценции NADH, гуминовых и фульвовых кислот приходится на одну область спектра, что требует мер по разделению этих сигналов. Учитывая литературные данные и результаты, полученные в настоящей работе, следует отметить сложность интерпретации принадлежности коротковолновой полосы флуоресценции с максимумом в области 320–350 нм. Вывод относительно излучающих центров должен базироваться как на общей характеристике водоёма, так и на дополнительных параметрах водного объекта. Высокие значения POУ и интенсивности флуоресценции при 320 нм с высокой вероятностью свидетельствуют о химическом загрязнении воды, а значения POУ, типичные для водного объекта, и высокие интенсивности флуоресценции при 320 нм — о бактериальном загрязнении. Что касается протеиноподобных веществ, то изученные в данной работе образцы речной воды не выявили их наличия.

Заключение

D_{254} малочувствительна к органическим загрязнениям антропогенного происхождения. В качестве параметра, позволяющего оценить загрязнённость воды органическими соединениями, предпочтительно использовать интенсивность флуоресценции при 320 и 450 нм. Коэффициент корреляции между D_{254} и РОУ для исследованных образцов, отобранных в разных точках Москвы-реки, составил 0,66, а между I_{450} и РОУ – 0,74. Присутствие в воде органических загрязнений увеличивает как интенсивность флуоресценции

при 450 и 320 нм, так и соотношение I^{320}/I^{450} в спектре флуоресценции воды. Наличие в воде бифидобактерий также увеличивает как интенсивность флуоресценции при 450 и 320 нм, так и соотношение I^{320}/I^{450} в спектре флуоресценции воды. Подводя итог, следует отметить, что измерение спектров флуоресценции и содержания растворённого органического углерода позволяет дать общую характеристику образца воды, что особенно актуально для пробы неизвестного состава, и выбрать оптимальную схему его целевого анализа. Однако данный метод не предназначен для количественного определения индивидуальных соединений.

Литература

(п. п. 6, 11, 13, 14, 16–18, 25 см. References)

1. Государственный доклад «О состоянии и использовании водных ресурсов Российской Федерации в 2015 году». М.: НИА-Природа; 2016.
2. Золотов Ю.А. Новая парадигма аналитического контроля. *Экология и промышленность России*. 2006; (3): 38–40.
3. Золотов Ю.А. Определение интегральных показателей как задача аналитической химии. *Журнал аналитической химии*. 2004; 59(7): 677.
4. Романовская Г.И. *Проблемы аналитической химии. Люминесцентный анализ*. М.: Наука; 2015.
5. Некрасов В.В. Проблемы мониторинга безопасности систем централизованного водоснабжения и перспективы их решения. *Российский химический журнал*. 2005; 49(4): 92–101.
7. Кузнецова А.В., Винокуров И.Ю. Применение флуориметрического метода для биоиндикации качества вод. *Вода: химия и экология*. 2011; (3): 58–65.
8. Мошарова И.В., Ильинский В.В., Маторин Д.Н., Мошаров С.А., Акулова А.Ю., Протопопов Ф.Ф. Мониторинг вод реки Москва с помощью микробиологических параметров и флуоресценции хлорофилла А. *Микробиология*. 2015; 84(6): 712–24. <https://doi.org/10.7868/S0026365615060075>
9. Салюк П.А., Дорошенко И.М., Букин О.А., Соколова Е.Б., Бауло Е.Н. Изменения свойств флуоресценции морской воды при ее перемешивании с нефтью. *Оптика атмосферы и океана*. 2014; 27(5): 443–8.
10. Дроздова А.Н., Пацаева С.В., Хунджия Д.А. Флуоресценция растворенного органического вещества как маркер распространения пресных вод в Карском море и заливах архипелага Новая Земля. *Океанология*. 2017; 57(1): 49–56. <https://doi.org/10.7868/S0030157417010038>
12. Некрасова Л.П., Кочеткова М.Г., Рыжова И.Н., Михайлова Р.И. Применение абсорбционной и флуоресцентной спектроскопии для решения задач контроля качества воды. *Системные технологии*. 2020; (4): 53–60.
15. Некрасова Л.П., Малышева А.Г., Абрамов Е.Г. Трансформация фенола и диатомных фенолов в поверхностной воде под действием природных физико-химических факторов. *Гигиена и санитария*. 2019; 98(11): 1206–11. <https://doi.org/10.18821/0016-9900-2019-98-11-1206-1211>
19. Дедков Ю.М. Современные проблемы аналитической химии сточных вод. *Российский химический журнал*. 2002; 46(4): 11–7.
20. Горшкова О.М., Пацаева С.В., Федосеева Е.В., Шубина Д.М., Южак В.И. Флуоресценция растворенного органического вещества природной воды. *Вода: химия и экология*. 2009; (11): 31–9.
21. Новиков М.А., Харламова М.Н. Исследование спектральных характеристик флуоресценции природных вод Кольского полуострова. *Труды ВНИРО*. 2016; 161: 181–93.
22. Синельников В.Е., Хмылев А.Н. Определение содержания органических веществ в природных водах с помощью спектров флуоресценции в видимой и ультрафиолетовой областях. *Гидрохимические материалы*. 1987; 98: 125–40.
23. Харламова М.Н., Новиков М.А. Спектральный анализ происхождения флуоресцирующей части растворенного органического вещества природных вод. В кн.: *Поморье в Баренц-регионе на рубеже веков: экология, экономика, культура. Материалы международной конференции*. Архангельск; 2000: 245–6.
24. Худжуа Д.А., Пацаева С.В., Трубецкой О.А., Трубецкая О.Е. Анализ растворенного вещества пресноводных озер Карелии обратно-фазовой высокоэффективной жидкостной хроматографией с одновременной регистрацией оптической плотности и флуоресценции. *Вестник Московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия*. 2017; (1): 66–73.

References

1. State report «On the state and use of water resources of the Russian Federation in 2015». Moscow: NIA-Priroda; 2016. (in Russian)
2. Zolotov Yu.A. A new paradigm of analytical checkup: from componentwise analysis to estimation of integrated parameters. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*. 2006; (3): 38–40. (in Russian)
3. Zolotov Yu.A. Determination of integral indicators as a task of analytical chemistry. *Zhurnal analiticheskoy khimii*. 2004; 59(7): 677. (in Russian)
4. Romanovskaya G.I. *Problems of Analytical Chemistry. Luminescent Analysis [Problemy analiticheskoy khimii. Lyuminescentnyy analiz]*. Moscow: Nauka; 2015. (in Russian)
5. Nekrasov V.V. Problems of monitoring the safety of centralized water supply systems and prospects for their solution. *Rossiyskiy khimicheskij zhurnal*. 2005; 49(4): 92–101. (in Russian)
6. Khan M.F.S., Akbar M., Wu J., Xu Z. A review on fluorescence spectroscopic analysis of water and wastewater. *Methods Appl. Fluoresc.* 2021; 10(1). <https://doi.org/10.1088/2050-6120/ac3d79>
7. Kuznetsova A.V., Vinokurov I.Yu. Application of the fluorimetric method for bioindication of water quality. *Voda: khimiya i ekologiya*. 2011; (3): 58–65. (in Russian)
8. Mosharova I.V., Il'inskiy V.V., Matorin D.N., Mosharov S.A., Akulova A.Yu., Protopyov F.F. Monitoring of the Moskva river water using microbiological parameters and chlorophyll A fluorescence. *Mikrobiologiya*. 2015; 84(6): 712–24. <https://doi.org/10.7868/S0026365615060075> (in Russian)
9. Salyuk P.A., Doroshenko I.M., Bukin O.A., Sokolova E.B., Baulo E.N. Change of seawater fluorescence properties when mixing with crude oil. *Optika atmosfery i okeana*. 2014; 27(5): 443–8. (in Russian)
10. Drozdova A.N., Patsaeva S.V., Khundzhia D.A. Fluorescence of dissolved organic matter as a marker for distribution of desalinated waters in the Kara sea and bays of Novaya Zemlya archipelago. *Okeanologiya*. 2017; 57(1): 49–56. <https://doi.org/10.7868/S0030157417010038> (in Russian)
11. Hidayah E.N., Pramitasari Y.N., Hsien Y.H., Cahyonugroho O.H. Fluorescence organic carbon components and its correlation with bulk organic parameters in water treatment processes. *J. Appl. Sci. Eng.* 2020; 23(3): 391–6. [https://doi.org/10.6180/jase.202009_23\(3\).0002](https://doi.org/10.6180/jase.202009_23(3).0002)
12. Nekrasova L.P., Kochetkova M.G., Ryzhova I.N., Mikhaylova R.I. Application of absorption and fluorescence spectroscopy for solving problems of water quality control. *Sistemnye tekhnologii*. 2020; (4): 53–60. (in Russian)
13. Ghervase L., Carstea E.M., Savastaru D., Pavelescu G. Fluorescence evaluation of drinking water organic contamination. *Environ. Eng. Manag. J.* 2010; 9(11): 1497–501. <https://doi.org/10.30638/eemj.2010.202>
14. Nekrasova L.P., Kochetkov P.P. Transformation of phenol, resorcinol, pyrocatechol and hydroquinone in water under exposure to low doses of UV-radiation. *J. Appl. Spectrosc.* 2021; 88(4): 807–15. <https://doi.org/10.1007/s10812-021-01244-x>
15. Nekrasova L.P., Malysheva A.G., Abramov E.G. Transformation of phenol and diatomic phenols in surface water under the impact of natural physical and chemical factors. *Gigiena i Sanitariya (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2019; 98(11): 1206–11. <https://doi.org/10.18821/0016-9900-2019-98-11-1206-1211> (in Russian)
16. Sorensen J.P.R., Lapworth D.J., Marchant B.P., Nkhuwa D.C.W., Pedley S., Stuart M.E., et al. In-situ tryptophan-like fluorescence: A real-time indicator of faecal contamination in drinking water supplies. *Water Res.* 2015; 81: 38–46. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.05.035>
17. Bulycheva E.V., Korotkova E.I., Voronova O.A., Kustova A.A., Petrova E.V. *Procedia Chem.* 2014; 10: 179–83. <https://doi.org/10.1016/j.proche.2014.10.031>
18. Huang M.F., Song Q.J., Xing X.F., Jian W.J., Liu Y., Zhao Z.L. Analysis of fluorescence spectrum of petroleum-polluted water. *Guang Pu Xue Yu Guang Pu Fen Xi*. 2014; 34(9): 2466–71. (in Chinese)
19. Dedkov Yu.M. Modern problems of analytical chemistry of waste waters. *Rossiyskiy khimicheskij zhurnal*. 2002; 46(4): 11–7. (in Russian)
20. Gorshkova O.M., Patsaeva S.V., Fedoseeva E.V., Shubina D.M., Yuzhakov V.I. Fluorescence of organic matter dissolved in natural water. *Voda: khimiya i ekologiya*. 2009; (11): 31–9. (in Russian)
21. Novikov M.A., Kharlamova M.N. Investigation of the spectral characteristics of the fluorescence of the Kola Peninsula natural waters. *Trudy VNIRO*. 2016; 161: 181–93. (in Russian)
22. Sinelnikov V.E., Khmylev A.N. Determination of the content of organic substances in natural waters using fluorescence spectra in the visible and ultraviolet regions. *Gidrokhimicheskie materialy*. 1987; 98: 125–40. (in Russian)
23. Kharlamova M.N., Novikov M.A. Spectral analysis of the origin of the fluorescent part of the dissolved organic matter of natural waters. In: *Pomerania in the Barents Region at the Turn of the Century: Ecology, Economy, Culture. Materials of the International Conference [Pomor'e v Barents- regione na rubezhe vekov: ekologiya, ekonomika, kul'tura. Materialy mezhdunarodnoy konferentsii]*. Arhangel'sk; 2000: 245–6. (in Russian)
24. Khudzhua D.A., Patsaeva S.V., Trubetskoy O.A., Trubetskaya O.E. An analysis of dissolved organic matter from freshwater Karelian lakes using reversed-phase high-performance liquid chromatography with online absorbance and fluorescence analysis. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 3. Fizika. Astronomiya*. 2017; (1): 66–73. (in Russian)
25. Zhu G.C., Bian Y.N., Hursthouse A.S., Wan P., Szymanska K., Ma J.Y., et al. Application of 3-D fluorescence: characterization of natural organic matter in natural water and water purification systems. *J. Fluoresc.* 2017; 27(6): 2069–94. <https://doi.org/10.1007/c10895-017-2146-7>